



高等学校“十三五”重点规划  
机械设计制造及其自动化系列

*JIDIAN CHUANDONG JI KONGZHI*

# 机电传动及控制

第3版

主 编◆王克义 路敦民 王 岚



 哈尔滨工程大学出版社



高等学校“十三五”重点规划  
机械设计制造及其自动化系列

JIDIAN CHUANDONG JI KONGZHI

# 机电传动及控制

第3版

主 编 王克义 路敦民 王 岚  
主 审 张立勋

常州大学图书馆  
藏书章

HEUP 哈尔滨工程大学出版社

## 内 容 简 介

本书共分9章。第1章为绪论,简要介绍机电传动系统的特点及发展历史;第2章介绍机电传动系统的动力学基础;第3章介绍直流电动机的工作特性;第4章介绍交流电动机的工作特性;第5章介绍传动系统中电动机的选择;第6章介绍机电传动系统电器控制;第7章介绍各种伺服电动机的特性;第8章介绍步进电动机特性;第9章介绍直流调速系统。

本书是机械设计制造及其自动化专业本科生教材,并可作为其他机械类与近机械类专业本科生教材,亦可供从事机电一体化工作的工程技术人员参考。

## 图书在版编目(CIP)数据

机电传动及控制 / 王克义, 路敦民, 王岚主编. —  
3版. —哈尔滨: 哈尔滨工程大学出版社, 2017.9  
ISBN 978-7-5661-1579-9

I. ①机… II. ①王… ②路… ③王… III. ①电力传  
动控制设备-高等学校-教材 IV. ①TM921.5

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 181600 号

选题策划 石 岭  
责任编辑 马佳佳  
封面设计 博鑫设计

---

出版发行 哈尔滨工程大学出版社  
社 址 哈尔滨市南岗区东大直街 124 号  
邮政编码 150001  
发行电话 0451-82519328  
传 真 0451-82519699  
经 销 新华书店  
印 刷 黑龙江龙江传媒有限责任公司  
开 本 787 mm × 1 092 mm 1/16  
印 张 13.5  
字 数 360 千字  
版 次 2017 年 9 月第 3 版  
印 次 2017 年 9 月第 1 次印刷  
定 价 29.80 元

<http://www.hrbeupress.com>

E-mail: heupress@hrbeu.edu.cn

---

# 前 言

本书是高等学校机械设计制造及其自动化专业的专业基础课,是从事机电系统设计必备知识的重要组成部分。通过本课程的学习,使学生了解机电传动的基本知识,注重理论分析的同时强化学生的工程实践意识,培养学生的分析问题能力、动手能力和创新能力。

本书主要内容包括机电传动及控制发展简介、机电传动系统动力学建模、直流电动机及拖动、交流电动机及拖动、机电传动系统中电动机的选择、机电传动系统的电器控制、伺服电动机以及直流调速的伺服控制。

本书的特色体现在理论讲解、仿真分析与实际案例相结合,在讲授基本理论的同时,以典型实际案例为例题,加强学生对知识应用能力的培养,每一章后均附有习题,加强课余训练;结构简图与实物相结合,在讲授电动机、控制元件的基本结构和工作方式时,通过结构简图介绍基本原理,增强学生感性认识和学习兴趣。

全书共分9章,第1章、第3章和第7章由路敦民编写;第2章、第4章和第6章由王克义编写;第5章、第8章和第9章由王岚编写。全书由王克义统稿,张立勋教授主审。

作者在编写过程中参考或引用了国内一些专家学者的论著,在此表示感谢!

由于作者水平有限,书中难免有错误或不妥之处,敬请广大读者批评指正。

编 者

2017年7月

# 目 录

第 1 章 绪论 .....	1
1.1 机电传动的特点及其地位 .....	1
1.2 机电传动及控制的发展状况 .....	3
1.3 课程内容及任务 .....	6
习题与思考题 .....	6
第 1 章 机电传动系统动力学 .....	7
2.1 单轴机电传动系统动力学方程 .....	7
2.2 多轴机电传动系统动力学方程 .....	9
2.3 负载机械特性方程 .....	21
2.4 机电传动系统的稳定运行 .....	23
习题与思考题 .....	25
第 3 章 直流电动机及拖动 .....	28
3.1 直流电动机的结构和工作原理 .....	28
3.2 直流电动机的分类及工作特性 .....	32
3.3 直流他励电动机的启动特性 .....	38
3.4 直流他励电动机的调速特性 .....	42
3.5 直流他励电动机的制动特性 .....	49
3.6 直流他励电动机传动系统的过渡过程 .....	57
习题与思考题 .....	60
第 4 章 交流电动机及拖动 .....	63
4.1 三相异步电动机的结构和工作原理 .....	63
4.2 三相异步电动机的定子电路和转子电路 .....	71
4.3 三相异步电动机运行 .....	74
4.4 三相异步电动机的转矩与机械特性 .....	76
4.5 三相异步电动机的启动特性 .....	81
4.6 三相异步电动机的调速特性 .....	87
4.7 三相异步电动机的制动特性 .....	90
4.8 单相异步电动机 .....	93
4.9 同步电动机 .....	96
习题与思考题 .....	99
第 5 章 机电传动系统中电动机的选择 .....	102
5.1 电动机种类、形式、电压和转速的选择 .....	102
5.2 电动机容量的选择 .....	103
习题与思考题 .....	109

<b>第6章 机电传动系统电器控制</b> .....	110
6.1 常用低压控制电器 .....	110
6.2 常用基本控制线路 .....	132
6.3 笼型异步电动机启动控制线路 .....	138
6.4 异步电动机正反转控制线路 .....	142
6.5 异步电动机的调速控制线路 .....	144
6.6 异步电动机制动控制线路 .....	146
习题与思考题 .....	149
<b>第7章 伺服电动机</b> .....	152
7.1 直流伺服电动机 .....	152
7.2 力矩电动机 .....	154
7.3 无刷直流电动机 .....	157
7.4 交流伺服电动机 .....	161
7.5 测速发电机 .....	165
7.6 直线电动机 .....	166
习题与思考题 .....	168
<b>第8章 步进电动机</b> .....	169
8.1 步进电动机的特点 .....	169
8.2 步进电动机的工作原理 .....	170
8.3 步进电动机的环形分配器及驱动 .....	174
8.4 步进电动机的选用 .....	186
习题与思考题 .....	188
<b>第9章 直流自动调速系统</b> .....	189
9.1 直流调速系统动态性能指标 .....	189
9.2 可控直流电源 .....	190
9.3 单闭环直流传动控制系统 .....	195
9.4 晶闸管-电动机直流传动控制系统稳态分析 .....	200
习题与思考题 .....	202
<b>附录</b> .....	203
附录 A 常用电气图形符号新旧对照表 .....	203
附录 B 电气设备常用基本文字符号 .....	207
附录 C 电气设备常用辅助文字符号新旧对照表 .....	209
<b>参考文献</b> .....	210

# 第1章 绪 论

## 1.1 机电传动的特点及其地位

人类科技发展史经历了从简单手工工具到复杂机械设备的漫长历程。在动力方面,古代利用人力、畜力、自然力(如风力、水力等)。在瓦特发明蒸汽机后,蒸汽机迅速成为机器的动力,极大地推动了生产力的发展。后来出现了电能,由于其具有适宜大量生产、集中管理、远距离传输和自动控制等优点,从而取代了蒸汽动力而成为工业发展的主要动力,推动了第二次工业革命的发展。当今时代,电能在现代化工农业生产、交通运输、科学技术、国防建设以及日常生活中的应用非常广泛。

电能是国民经济各部门中应用最广泛的能源,它的广泛应用是和电机紧密相关的。电能的产生一般是通过发电机,它把其他形式的能源转化成电能,而电能的应用主要是转化成机械能,这是通过电动机来实现的。电机根据能量传递关系分为发电机和电动机两大类。

机电传动(又称电气传动或电力拖动)是以电动机作为原动机驱动生产机械系统的总称。机电传动系统是将电能转变为机械能的装置,通过对电动机的控制,用以实现生产机械的启动、停止、速度调节以及各种生产工艺过程的要求。其主要强调电动机的结构、工作原理和控制特性。

运动控制系统是以机械运动的驱动设备——电动机为控制对象,以控制器为核心,以电力电子功率变换装置为执行机构,在自动控制理论的指导下组成的机电传动自动控制系统。其主要强调对电动机进行驱动和伺服控制,是以机电传动作为基础的。

### 1.1.1 机械系统驱动装置特点

现在机械系统的驱动装置,按动力源分为液压、气动和电动三大类,根据需要也可由这三种基本类型组合成复合式的驱动系统。这三类基本驱动系统各有自己的特点。

#### 1. 液压驱动系统

液压驱动系统是一种比较成熟的技术,能够以较小的驱动器输出较大的驱动力或力矩,即获得较大的功率重量比,普通液压系统的压力一般为 $0.5 \sim 32$  MPa。可以把驱动油缸直接做成关节的一部分,故结构简单紧凑、刚性好,易于实现直接驱动。由于液体的不可压缩性,故液压驱动系统能快速响应、定位精度高,并可实现任意位置的开停;液压驱动调速比较简单和平稳,能在很大调整范围内实现无级调速;使用安全阀可简单而有效地防止过载现象发生;润滑性能好、寿命长。但液压系统需进行能量转换(电能转换成液压能),速度控制多数情况下采用节流调速,效率比电动驱动系统低。液压系统的油液容易泄漏,这不仅影响工作的稳定性与定位精度,而且会造成环境污染,工作噪声也较高。因油液黏度随温度而变化,且在高温与低温条件下很难应用。另外,它也容易混入气泡、水分等,使系统的刚性降低,速度特性及定位精度降低。

液压驱动系统大多用于要求输出力较大而运动速度较低的场所,系统需配备压力源及复杂的管路系统,成本高,可靠性差,维修保养麻烦。

## 2. 气动驱动系统

气动驱动系统包括三个子系统:空气压缩和处理、控制(通过阀门)和输出驱动(缸或电机)。这些组件在操作过程中很少需要维护,这样使用寿命会延长。压缩空气是很容易获得的,也不会带来任何火灾或爆炸危险。然而,生产和准备压缩空气是很昂贵的,并且排气的刺耳噪音必须得压制。压缩空气对温度的变化不敏感,如果出现泄漏,也不会影响机器的安全或是污染环境。在广泛的范围内,制动器速度和力度是可以简单控制的,但可能很难实现恒定和均匀的活塞速度。

气动所使用的气压一般为 $0.4 \sim 0.6 \text{ MPa}$ ,最高可达 $1 \text{ MPa}$ 。由于压缩空气的黏性小,流速快,一般压缩空气在管路中流速可达 $180 \text{ m/s}$ ,所以驱动快速性好;气动装置的废气可直接排入大气不会造成污染,但会发出尖锐的噪声;可以通过调节气量实现无级调速;由于空气的可压缩性,气动驱动系统具有很好的缓冲作用,但也因此很难保证高的定位精度。

可见,气动驱动系统具有速度快、系统结构简单,工作安全可靠、维修方便、价格低、不污染环境以及适于在恶劣环境下工作等特点。适于在中小负荷的机械系统中采用。但难于实现伺服控制,多用于程序控制的机械人中,如在上下料、冲压机器人,仪表及轻工行业中小型零件的输送和自动装配等作业,食品包装及输送,电子产品输送、自动插接,弹药生产自动化等方面获得广泛应用。且多数情况下是用于实现推力偏小,两位式或有限点位的控制中,不能实现精确的中间位置调节。

## 3. 电动驱动系统

电动驱动是利用各种电动机产生力和力矩,直接或经过机械传动去驱动执行机构,以获得系统的各种运动。其因为省去了中间能量转换的过程,所以比液压、气动驱动效率高,使用方便且成本低。电机驱动精确度高,调速方便,但推力相比液压驱动较小,如实现大推力时,系统结构庞大、成本高。

### 1.1.2 机电传动系统的地位

电能的广泛应用使轻便灵活的电动机成为机械的主要动力源。以电动机为原动机构成的机电传动系统是现代化生产中必不可少的传动系统,相比其他拖动方法(例如风力拖动、水力拖动、内燃机拖动等),具有许多无法比拟的优点。最主要的优点是启动、调速、制动、反转等都比其他方法容易实现,而且可获得所需的静态特性和动态特性,特别是数控技术和计算机技术的应用,进一步提高了机电传动的性能指标,使采用机电传动时的生产率和产品质量进一步提高。它为生产过程的自动化提供了十分有利的条件,是生产过程电气化、自动化的重要前提。

机电传动与国民经济、人民生活有着密切的联系并起着重要的作用,广泛用于冶金、机械、轻工、矿山、港口、石化、航空航天等各个行业以及日常生活之中。它既有轧钢机、起重机械、泵、风机、精密机床等大型调速系统,也有空调机、电冰箱、洗衣机等小容量调速系统。据统计,机电传动系统的用电量占我国总发电量的60%以上。2000—2010年我国机电传动产品市场需求年增长率约为15%,市场前景广阔。因此,机电传动是国民经济中充满活力的基础技术和高新技术,它的发展和进步已成为更经济地使用材料、能源及提高劳动生产率的合理手段,成为促进国民经济不断发展的重要因素,成为国家现代化的重要标志之一。



正确使用机电传动系统并使之进一步向前发展,对国民经济建设具有十分重要的现实意义。

## 1.2 机电传动及控制的发展状况

机电传动系统的组成如图 1-1 所示。



图 1-1 机电传动系统的组成

### 1.2.1 传动方式的发展

机电传动及其控制系统总是随着社会生产的发展而发展。单就机电传动而言,它的发展大体上经历了成组传动、单机传动和多机传动三个阶段。初期的机电传动都是成组传动的,就是一台电动机拖动一根天轴,然后再由天轴通过皮带轮和皮带分别拖动各个生产机械,即一台电动机拖动成组的生产机械。这种方式生产效率较低,劳动条件较差,一旦电动机发生故障,将造成成组的生产机械停车。以后改进成单机传动,即一台电动机拖动一台生产机械,它省去了大量中间传动机构,效率高,控制线路简单,生产安全。随着设备的大型复杂化,一台生产机械具有多个工作机构,运动形式也各不相同,进而发展成多机传动,即多台电动机分别拖动生产机械的多个工作部位,例如龙门刨床的刨台、左右垂直刀架与侧刀架、横梁及其夹紧机构,均分别由一台电动机拖动,它不仅简化了机械结构,而且控制灵活,便于实现自动化,所以,现代化机电传动基本上均采用这种传动方式。上述发展是从传动效率角度来看机电传动的演变过程。

### 1.2.2 电机的发展状况

随着生产力的发展,蒸汽动力在使用和管理上的不便,迫使人们去寻找新的能源和动力,此时电磁学得到了兴起和发展。1820年,奥斯特发现了电流的磁感应,从而揭开了研究电磁本质的序幕;1821年,法拉第进行了电流在磁场中受到电磁力的实验以后,出现了电动机的雏形;1831年,法拉第提出了电磁感应定律,同年10月他发明了世界第一台发电机。

机电传动系统根据速度是否可调分为不调速和调速两大类,而在调速系统中,又根据速度是否可以连续调节分为无级调速和有级调速两类。按照电动机的类型不同,机电传动又分为直流与交流传动两大类。直流机电传动与交流机电传动在19世纪先后诞生,但当时的机电传动系统是不调速系统。随着社会化大生产的不断发展,生产制造技术越来越复杂,对生产工艺的要求越来越高。这就要求生产机械能够在工作速度、启动和制动、正反转运行等方面具有较好的静态和动态性能,从而推动电动机的调速技术不断向前发展。

由于直流电动机的调速性能和转矩控制性能较好,20世纪30年代起,就开始使用直流调速系统。由最初的旋转变流机组控制发展为电机放大机、磁放大机控制,再进一步用晶闸管、电力晶体管控制,使系统快速性、可靠性和经济性不断提高,应用非常广泛。然而,由于直流电动机具有电刷和换向器,所以制造工艺复杂、成本高、维护麻烦,单机容量和转速

都受到限制,它的局限性也逐渐显露出来。

交流电动机中的异步电动机,具有结构简单、制造容易、价格低廉、运行可靠、维护方便、效率较高等一系列优点,早就普遍应用于恒速运行的生产机械中。由于其调速性能和转矩控制性能不够理想,长期以来难以推广使用。近三十年来,由于电力电子技术的发展,才出现各种类型的交流调速系统。例如:变频调速、串级调速、磁场定向控制调速等系统。发明矢量控制之后,使得交流调速系统逐步具备了宽的调速范围、高的稳态精度、快的动态响应以及在四象限做可逆运行等良好的技术性能,在调速性能方面完全可与直流调速系统相媲美,所以才逐渐得到应用。计算机控制技术和现代控制理论应用于交流调速系统后,为其发展创造了更加有利的条件,使交流调速系统成为当前发展和研究的重点。采用微机控制以后,用软件实现矢量控制算法,使硬件电路规范化,从而降低了成本,提高了可靠性,而且还有可能进一步实现更复杂的控制技术。电力电子和微机控制技术的迅速进步是推动交流调速系统不断更新的动力。交流传动正逐步取代直流传动而成为机电传动的主流,未来机电传动的发展方向将趋于交流化、高频化。不过由于交流调速控制系统比较复杂,中小容量的调速装置价格偏高,实现四象限运行要比直流传动复杂。交流调速的上述缺点如果不能完全克服,直流调速仍会在许多场合继续发挥作用。

### 1.2.3 控制手段的发展状况

从控制手段的发展来看,早期机械系统由人工手动控制,操作者通过眼、耳等感觉器官观察机械的运行状态,同时运用其经验和知识进行分析、判断,通过手脚操作机械,该方式系统运行状态取决于操作者的操作水平。后来一些简单的机械控制机构代替了操作者的部分劳动,进一步提高了系统运行效率。随着控制器件的发展,特别是功率器件、放大器件的不断更新,最后发展成为电气控制。

20世纪初,开始采用继电器、接触器和行程开关等控制电器,实现对控制对象的启动、停止以及有级调速等控制,是一种断续开关量控制。这种电器控制装置适用于动作比较简单、控制规模小的场合,具有结构简单、价格低廉、维护方便、抗干扰强等特点,因此广泛应用于各类机床和机械设备上。采用这种控制装置相比人工手动控制可以方便地实现生产过程自动化,而且还可以实现集中控制和远距离控制。但继电器、接触器控制线路也存在一定的缺点,如由于是固定接线形式,在进行程序控制时,改变控制程序不方便,灵活性差;采用有触点的开关动作,工作频率低,触点易损坏,可靠性差,另外它的控制速度慢,控制精度低。尽管如此,这种控制装置仍能满足在一定范围内的机械设备的自动控制。目前,继电器接触器控制仍然是机床和其他机械设备最基本的电气控制形式之一。

20世纪30年代出现了电机放大机控制,它使控制系统从断续控制发展成连续控制,连续控制系统可随时检查控制对象的工作状态,它的快速性及控制精度都大大超过了最初的断续控制,并简化了控制系统,减少了电路中的触点,提高了可靠性,使生产效率大为提高。20世纪四五十年代出现了磁放大器控制和大功率可控水银整流器控制。

20世纪50年代末期出现了大功率固体可控整流元件——晶闸管,后又出现了功率晶体管控制。由于二极管、晶体管、集成电路等半导体逻辑元件,组成了可靠性较高的无触点逻辑控制装置,这种控制装置与继电器接触器控制装置相比较,具有体积小、可靠性好、反应速度快、寿命长等优点,晶闸管的出现为机电传动自动控制系统开辟了新纪元。然而,这种装置也是固定接线,仍不能更好地解决通用性和灵活性问题。此方法适用于专机的专用

控制系统。

20世纪60年代电子计算机的出现及其在工业控制中的大量应用,大大提高了控制装置的通用性和灵活性,使控制系统发展到一个新阶段——采样控制。采样控制虽然也是一种断续控制,但和最初的断续控制不同,它具有采样速度快和控制功能强等优点。但对于某些开关量的自动控制来说,不需要复杂的数学运算,而要求编制程序简单,使用维修方便。如果采用通用的电子计算机来完成开关量的控制,则存在不经济等问题。因此,需要一种比电气控制装置和半导体逻辑控制装置通用性和灵活性强,又比计算机控制装置简便而经济的开关量控制装置,顺序控制器就是适应这样的需要而产生的。顺序控制器是通过组合逻辑元件插接或编程来实现继电器接触控制线路功能的装置。顺序控制器的类型较多,它可以满足程序经常改变的控制要求,使机床和机械设备的控制系统具有较大的灵活性和通用性。它的主要优点是:通用性强,程序可变,编程容易,可靠性高和使用、维护方便。但这种控制系统的输入/输出端数目往往受到矩阵板本身结构的限制,而且抗干扰性差。由于电力电子元件的发展以及价格的降低,目前顺序控制器已较少应用了。

目前,由于大规模集成电路的发展,以及微处理机的价格低廉,因此采用微处理机组成的可编程序控制器已获得了广泛的应用。可编程序控制器的核心为可编程序逻辑控制器,简称 PLC,是1969年才开始发展的。它按照成熟而有效的继电器接触控制概念和设计思想,利用不断发展的新技术、新电子器件,逐步形成了具有特色的各种系列产品。

20世纪70年代初,计算机数字控制(CNC)系统应用于数控机床和加工中心,这不仅加强了自动化程度,而且提高了机床的通用性和加工效率,在生产上得到了广泛应用。20世纪80年代以来,出现了由数控机床、工业机器人、自动搬运车等组成的统一由中心计算机控制的机械加工自动线——柔性制造系统(FMS),它是实现自动化车间和自动化工厂的重要组成部分。机械制造自动化高级阶段是走向设计、制造一体化,即利用计算机辅助设计(CAD)与计算机辅助制造(CAM)形成产品设计和制造过程的完整系统,对产品构思和设计直至装配、试验和质量管理这一全过程实现自动化。

尽管机电控制已向无触点、连续控制、弱电化、微机化的方向发展,但由于继电器接触器控制系统所用的控制电器结构简单、价格便宜,能够满足生产设备一般生产的需要,目前仍得到广泛的应用。继电器接触器控制的设计方法是设计机械设备过程控制的基础。掌握了它的设计方法后,学习其他的控制方法便更容易。

#### 1.2.4 控制元件的发展

机电传动控制装置主要是各种电力电子变流器,它为电动机提供可控的直流或交流电流,并成为弱电控制强电的媒介。

电力电子技术的前身是汞弧整流器、闸流管变流技术。1957年晶闸管(SCR)的诞生标志着电力电子技术的问世,1960—1980年为电力电子技术第一代,其特征是以晶闸管及其相控变流技术为代表,称之为整流器时代。

1980年以后进入大功率晶体管(GTR)、可关断晶闸管(GTO)等电流控制自关断电力电子器件及逆变技术为代表的第二代,称之为逆变时代。

1990年以后进入复合电力电子器件及变频技术为代表的第三代,复合器件具有快速关断、工作频率高等特点,其典型代表是绝缘栅双极型晶体管(IGBT)和电力场效应晶体管(Power MOSFET)等。第三代变频技术和变频器得到了空前的发展,故称其为变频时代。

从现在开始正逐步进入电力电子智能化时代,其特点是电力电子器件进一步采用微电子集成电路技术,实现电力电子器件和装置的智能化。

### 1.3 课程内容及任务

机电传动及控制是高等学校机械设计制造及其自动化专业的一门专业基础课。本课程的教学内容主要包括机电传动系统的动力学基础,直流电动机、交流电动机、步进电动机的各种特性,机电传动系统中电动机的选择,机电传动系统电器控制,直流自动调速系统等。

本课程的作用和任务是使学生了解机电传动的基本知识,了解电机直流自动调速系统;掌握直流、交流电动机,步进电动机的工作原理、应用和选择方法,机电传动系统电器控制等内容。

#### 习题与思考题

- 1-1 机电传动系统与运动控制系统有何异同?
- 1-2 机电传动系统的主要特点是什么?
- 1-3 从传动效率角度来看机电传动的演变过程主要分成哪几类?
- 1-4 从能量传递关系角度来看电机分成哪两类?
- 1-5 简述直流电动机和交流电动机的特点。

## 第2章 机电传动系统动力学

### 2.1 单轴机电传动系统动力学方程

机电传动系统是机、电统一的运动系统,是由电动机拖动,并通过传动机构带动生产机械运转的动力学整体。生产生活中电动机的种类繁多、特性各异、传动形式多样、负载性质和控制方法也各不相同,但它们之间都满足一种内在规律,即动力学规律,通过建立动力学模型能够深入地分析和研究机电传动系统的运动特性。

现以最简单的机电传动系统为对象,即由一台电动机通过联轴节直接与生产机械相连,该系统只包含一根轴,所以称为单轴机电传动系统,又称单轴拖动系统,如图2-1所示。

在该系统中电动机M的输出转矩为 $T_M$ ,用于克服生产机械的负载转矩 $T_L$ ,以带动系统运动。此时,如果两个转矩大小相等,由牛顿第一定律可知,系统的运动状态处于静态或者稳态,角速度 $\omega$ 为常数,角加速度 $d\omega/dt=0$ ;如果 $T_M \neq T_L$ 时,由牛顿第二定律可知,系统运动状态将处于动态,角速度 $\omega$ 就要发生变化,角加速度 $d\omega/dt \neq 0$ ,该变化的大小与传动系统的转动惯量 $J$ 和作用在系统上的合力矩( $T_M - T_L$ )的值有关。把上述关系用方程式表示,即为

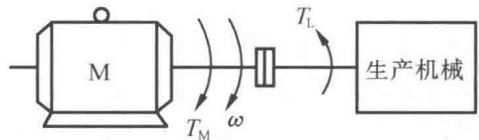


图2-1 单轴拖动系统

式(2-1)就是国际单位制情况下的单轴机电传动系统的动力学方程式,考虑到转矩和转速均为矢量,参考图2-1和式(2-1)作如下定义:规定系统某一旋转方向为正,并以此方向作为参照,电动机的转矩 $T_M$ 的方向与所规定的正方向相同时为正,相反时为负,为正时加速系统运行,是驱动转矩,为负时减速系统运行,是制动转矩;负载转矩 $T_L$ 的方向规定与电动机转矩 $T_M$ 方向规定正好相反,即与所规定的正方向相同时为负,相反时为正,为正时减速系统运行,是制动转矩,为负时加速系统运行,是驱动转矩。以上矢量方向关系可以用图2-2所示轴端图来表示,图中选择逆时针旋转方向为正。

$$T_M - T_L = J \frac{d\omega}{dt} \quad (2-1)$$

式中  $T_M$ ——电动机输出的转矩,  $N \cdot m$ ;  
 $T_L$ ——传动系统的负载转矩,  $N \cdot m$ ;  
 $J$ ——传动系统的转动惯量,  $kg \cdot m^2$ ;  
 $\omega$ ——传动系统的角速度,  $rad/s$ ;  
 $t$ ——时间,  $s$ 。

式(2-1)就是国际单位制情况下的单轴机电传动系统的动力学方程式,考虑到转矩和转速均为矢量,参考图2-1和式(2-1)作如下定义:规定系统某一旋转方向为正,并以此方向作为参照,电动机的转矩 $T_M$ 的方向与所规定的正方向相同时为正,相反时为负,为正时加速系统运行,是驱动转矩,为负时减速系统运行,是制动转矩;负载转矩 $T_L$ 的方向规定与电动机转矩 $T_M$ 方向规定正好相反,即与所规定的正方向相同时为负,相反时为正,为正时减速系统运行,是制动转矩,为负时加速系统运行,是驱动转矩。以上矢量方向关系可以用图2-2所示轴端图来表示,图中选择逆时针旋转方向为正。

在工程实际中式(2-1)国际单位制的动力学方程应用并不方便,描述传动系统的惯性时往往不用转动惯量 $J(kg \cdot m^2)$ 而用飞轮惯量(又称飞轮转矩) $GD^2(N \cdot m^2)$ ,不用角速度 $\omega(rad/s)$ ,而用转速 $n(r/min)$ 。由理论力学可知 $J = m\rho^2 = \frac{1}{4}mD^2$ ,而 $G = mg$ ,所以

$$J = \frac{1}{4}mD^2 = \frac{GD^2}{4g} \quad (2-2)$$

式中  $g$ ——重力加速度,  $\text{m/s}^2$ ;  
 $m$ ——旋转部分的质量,  $\text{kg}$ ;  
 $G$ ——系统旋转部分的重力,  $\text{N}$ ;  
 $\rho$ ——系统旋转部分的惯性半径,  $\text{m}$ ;  
 $D$ ——系统旋转部分的惯性直径,  $\text{m}$ 。

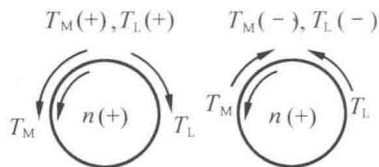


图 2-2 轴端图

旋转运动角速度为

$$\omega = \frac{2\pi}{60}n \quad (2-3)$$

式中  $\omega$ ——系统旋转角速度,  $\text{rad/s}$ ;  
 $n$ ——系统旋转速度,  $\text{r/min}$ 。

将式(2-2)和式(2-3)代入式(2-1),可得

$$T_M - T_L = J \frac{d\omega}{dt} = \frac{GD^2}{4g} \cdot \frac{d\omega}{dt} = \frac{GD^2}{375} \cdot \frac{dn}{dt} \quad (2-4)$$

这里  $GD^2$  我们认为是一个整体,不再理解为  $G$  和  $D^2$  的乘积。注意:375 是  $\frac{4 \times 60g}{2\pi}$  计算所得,故它的量纲为加速度,单位为  $\text{m/s}^2$ 。

动力学方程式是研究机电传动系统最基本的方程式,它决定着系统运动的特征。处于动态时,由达朗伯定律可知系统中必然存在一个动态转矩,即

$$T_d = \frac{GD^2}{375} \cdot \frac{dn}{dt} \quad (2-5)$$

它使系统的运动状态发生变化。这样,运动方程式(2-1)或式(2-4)也可以写成转矩平衡方程式,即

$$T_M - T_L = T_d \text{ 或 } T_M = T_d + T_L \quad (2-6)$$

就是说,电动机所产生的转矩在任何情况下,总是由轴上的负载转矩(即静态转矩)和动态转矩之和所平衡。

**例 2-1** 已知轴端图 2-3,各矢量方向和大小在图中已标出,飞轮惯量为  $GD^2$ ,试求:

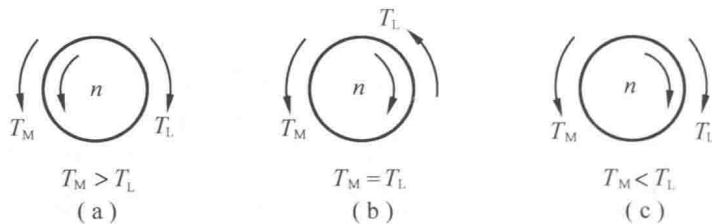


图 2-3 例 2-1 的轴端图

- (1) 根据图示情况,列出各机电传动系统的动力学方程式;
- (2) 说明各图中  $T_M, T_L$  是驱动转矩,还是制动转矩;
- (3) 根据各图中所示情况,说明各系统的运行状态是加速、减速还是匀速。

解 (1)按各矢量方向的约定:当  $T_M$  与  $n$  同向时,  $T_M$  为正,否则为负;当  $T_L$  与  $n$  反向时,  $T_L$  为正,否则为负。故,图 2-3(a)的动力学方程为  $T_M - T_L = \frac{GD^2}{375} \cdot \frac{dn}{dt}$ ;图 2-3(b)的动力学方程为  $-T_M - T_L = \frac{GD^2}{375} \cdot \frac{dn}{dt}$ ;图 2-3(c)的动力学方程为  $-T_M + T_L = \frac{GD^2}{375} \cdot \frac{dn}{dt}$ 。

(2)因为力矩  $T$  与  $n$  同向时,  $T$  为驱动转矩;  $T$  与  $n$  反向时,  $T$  为制动转矩。从图中矢量方向或动力学方程中可以看出:图 2-3(a)中,  $T_M$  为驱动转矩,  $T_L$  为制动转矩;图 2-3(b)中,  $T_M$  为制动转矩,  $T_L$  为制动转矩;图 2-3(c)中,  $T_M$  为制动转矩,  $T_L$  为驱动转矩。

(3)当动态转矩  $T_d > 0$  时,机电传动系统为加速;  $T_d < 0$  时为减速;  $T_d = 0$  时为匀速。从图中各矢量的大小和方向或者根据动力学方程所得的动态转矩可知:图 2-3(a)中加速运行状态;图 2-3(b)中减速运行状态;图 2-3(c)中加速运行状态。

## 2.2 多轴机电传动系统动力学方程

上节所介绍的是单轴传动系统的动力学方程,但在实际应用中,很多生产机械都是采用多轴机电传动系统,即包含多个轴,且多个轴之间具有一定的运动关系,原因在于许多生产机械为了满足其工艺要求,例如需要较低的转速,或者需要平移、升降等不同的运动形式,而在制造电动机时,为了合理地利用材料和降低成本,除特殊情况外(例如力矩电动机,额定转速较低;又如直线电动机,输出直线位移),一般都做成额定转速较高的旋转电动机,因此在电动机与工作机械之间必须装设变速机构,如齿轮变速、蜗轮蜗杆变速、皮带变速等。

建立多轴传动系统动力学方程,可以按照分析单轴系统的方法,分别列写每根轴的动力学方程式,以及各轴之间相互联系的关系式,然后再将这些方程式联立,即可求得系统的运动规律,这种方法称为联立约束法。这种方法当传动轴越多时,列写的方程式就越多,工作量就越大,但对于有些情况(例如非线性传动系统、含弹性阻尼特性的传动系统等)需要采用该方法建立动力学方程。实际分析和计算多轴传动时,通常采用折算方法,即将所有轴的负载转矩和惯量都折算到同一根轴上(通常折算到电动机轴上,这样方便电动机的计算),将系统等效为图 2-1 所示的典型单轴系统,然后使用基本动力学方程式求解。折算时的基本原则是折算前的多轴系统和折算后的单轴系统,在能量关系上保持不变,即在负载转矩折算时功率不变,在惯量折算时系统储存的动能不变。下面介绍不同运动形式时系统的折算方法。

### 2.2.1 旋转运动负载转矩和惯量的折算

旋转运动是指工作机构输出的运动形式为旋转。

#### 1. 负载转矩的折算

负载转矩是静态转矩,描述的是静态特性,所以根据静态时功率守恒原则进行折算。

图 2-4 所示为一工作机械做旋转运动的多轴系统,设定工作机械负载转矩为  $T_g$ ,折算到电动机轴上后为  $T_L$ 。折算的原则是系统传递的功率不变。传动机构的损耗在传动效率  $\eta_c$  中考虑。

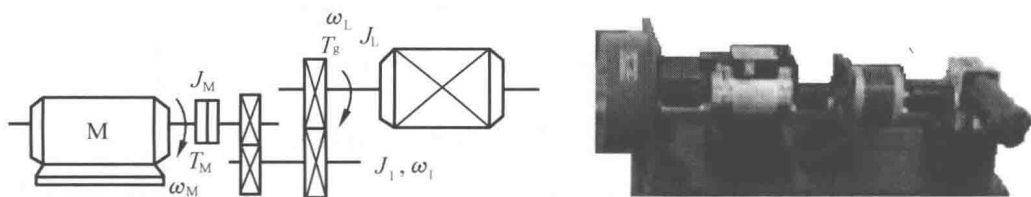


图 2-4 旋转运动多轴系统

(1) 电动机工作在电动状态

电动机工作在电动状态是指运动从电动机传到工作机构,传动损耗由电动机承担。对图 2-4 所示的系统,令系统稳态转速为  $\omega_L$ ,则生产机械的负载功率为

$$P_g = T_g \omega_L \quad (2-7)$$

式中  $T_g$ ——生产机械的负载转矩;

$\omega_L$ ——生产机械的旋转角速度。

设  $T_g$  折算到电动机轴上的负载转矩为  $T_L$ ,则电动机轴上的输出功率为

$$P_L = T_L \omega_M \quad (2-8)$$

其中,  $\omega_M$  为电动机的旋转角速度。

考虑到传动机构在传递功率过程中的损耗,有

$$\eta_c = \frac{\text{输出功率}}{\text{输入功率}} = \frac{P_g}{P_L} = \frac{T_g \omega_L}{T_L \omega_M}$$

于是可得折算到电动机轴上的负载转矩,即

$$T_L = \frac{T_g \omega_L}{\eta_c \omega_M} = \frac{T_g}{\eta_c i} \quad (2-9)$$

式中  $i$ ——传动机构的速比,  $i = \omega_M / \omega_L$ ;

$\eta_c$ ——电动机拖动生产机械运动时的传动效率。

(2) 电动机工作在发电状态

电动机工作在发电状态是指运动从工作机构传到电动机,传动损耗由工作机构承担。传送到电动机的功率小于工作机构轴上的功率,按传递功率不变的原则,可得

$$T_L = \frac{T_g \eta'_c}{i} \quad (2-10)$$

其中,  $\eta'_c$  为生产机械拖动电动机运动时的传动效率。

式(2-10)中其他各符号的含义与式(2-9)中相同,其中总的速比  $i = \frac{\omega_M}{\omega_L}$  为电动机轴与工作机构轴的转速比,在多轴电力拖动系统中,应为各级速比的乘积,即  $i = i_1 \cdot i_2 \cdot i_3 \cdot \dots$ 。一般设备中,电动机的转速高于工作机构的转速,即  $i > 1$ ,因而工作机构的转矩折算到电动机轴上变小了许多。总的传动效率在多轴电力拖动系统中,应为各级传动效率的乘积,即  $\eta_c = \eta_1 \cdot \eta_2 \cdot \eta_3 \cdot \dots$ 。各级传动效率的大小随各级传动机构的不同而不同。

## 2. 惯量的折算

由于转动惯量和飞轮转矩描述的是运动特性,与运动系统的动能有关,与传动效率无关,所以不存在电动机工作状态的差异,因此可根据动能守恒原则进行折算。

对于旋转运动(如图 2-4 所示的拖动系统),折算前的动能为



$$W_g = \frac{1}{2} J_g \omega_L^2 \quad (2-11)$$

设  $J_g$  折算到电动机轴上的转动惯量为  $J_L$ , 则电动机轴上的动能为

$$W_L = \frac{1}{2} J_L \omega_M^2 \quad (2-12)$$

由  $W_g = W_L$  可得

$$J_L = J_g \frac{\omega_L^2}{\omega_M^2} = \frac{J_g}{i^2} \quad (2-13)$$

由此可得折算到电动机轴上的总转动惯量为

$$J_a = J_M + \frac{J_1}{i_1^2} + \frac{J_g}{i^2} \quad (2-14)$$

式中  $J_M, J_1, J_g$ ——电动机轴、中间传动轴、生产机械轴上的转动惯量;

$i_1$ ——电动机轴与中间传动轴之间的速比,  $i_1 = \frac{\omega_M}{\omega_1}$ ;

$i$ ——电动机轴与生产机械轴之间的速比,  $i = \frac{\omega_M}{\omega_L}$ ;

$\omega_M, \omega_1, \omega_L$ ——电动机轴、中间传动轴、生产机械轴上的角速度。

根据转动惯量和飞轮转矩之间的关系, 不难得得出折算到电动机轴上的总飞轮转矩为

$$(GD^2)_a = (GD^2)_M + \frac{(GD^2)_1}{i_1^2} + \frac{(GD^2)_g}{i^2} \quad (2-15)$$

其中,  $(GD^2)_M, (GD^2)_1, (GD^2)_g$  分别为电动机轴、中间传动轴、生产机械轴上的飞轮转矩。

当速比  $i$  较大时, 中间传动机构的转动惯量  $J_1$  或飞轮惯量  $(GD^2)_1$ , 在折算后占整个系统的比重不大。实际工程中, 为了计算方便起见, 多采用适当加大电动机轴上的转动惯量  $J_M$  或飞轮惯量  $(GD^2)_M$  的方法, 来考虑中间传动机构的转动惯量  $J_1$  或飞轮惯量  $(GD^2)_1$  的影响, 于是有

$$J_a = \delta J_M + \frac{J_g}{i^2} \quad (2-16)$$

或

$$(GD^2)_a = \delta (GD^2)_M + \frac{(GD^2)_g}{i^2} \quad (2-17)$$

一般  $\delta = 1.1 \sim 1.25$ 。为更简便起见, 可将负载惯量也加以估算, 有

$$J_a = \delta J_M \text{ 或 } (GD^2)_a = \delta (GD^2)_M$$

此时  $\delta$  应稍微增大一些, 可取  $\delta = 1.2 \sim 1.3$ 。

### 2.2.2 平移运动负载转矩和惯量的折算

平移运动是指工作机构输出的运动形式为水平面内的移动。

#### 1. 负载转矩的折算

某些生产机械的工作机构是作平移运动的, 如丝杠螺母机构等。图 2-5 所示为刨床的工作台和工件, 它是由电动机通过齿轮变速后, 再通过齿轮与齿条啮合带动作平移运动的多轴系统。